

Motor aspects of binocularity

Citation for published version (APA):

Bosman, J. (2001). *Motor aspects of binocularity*. [Doctoral Thesis, Maastricht University]. Datawyse / Universitaire Pers Maastricht. <https://doi.org/10.26481/dis.20011212jb>

Document status and date:

Published: 01/01/2001

DOI:

[10.26481/dis.20011212jb](https://doi.org/10.26481/dis.20011212jb)

Document Version:

Publisher's PDF, also known as Version of record

Please check the document version of this publication:

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

www.umlib.nl/taverne-license

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

repository@maastrichtuniversity.nl

providing details and we will investigate your claim.

7.1 Summary.

If we look with both eyes at an object, our brain can fuse the images from both eyes into one three dimensional object. This process, called *stereopsis*, only functions when both eyes are pointed accurate towards the fixation object and can actually see the object with both eyes. A subject will have no or limited stereopsis when one of these demands is not obeyed, as is the case in subjects with *strabismus* (cross-eyed vision) or *amblyopia* (lazy eye). In normal healthy subjects, all three-dimensional eye movements can be described using Listing's law. This law can predict all eye orientations in three dimensions (horizontal, vertical and torsional) accurately. Although in normal subjects all eye movements have been described accurately, the purpose and origin of this law is still not completely known. Several aspects are still unclear of which some are discussed in this thesis. Why do our eyes move in such a specific way, how does visual feedback aid binocular control of eye movements and how are our eye movements controlled neuronally? Another aspect that was investigated is the question whether patients with strabismus and amblyopia obey the same laws as normal healthy subjects do.

Finally a binocular eye movement system is described, that can measure horizontal and vertical eye movements using a ccd-camera. With this system, the development of binocular eye movements in babies can be investigated.

Chapter 1, presents a basic overview in the field of binocular eye movements. In this chapter the various types of eye movements, basic anatomy of the eye muscles, Donders' and Listing's law and the definition of binocularity is described.

In **chapter 2** the influence of a sudden change in visual input on the vestibulo-ocular reflex was assessed. During head shaking, the visual input of both eyes was changed rapidly by means of a displacement prism. As a consequence, the subject has to make a horizontal vergence eye movement (i.e. a disconjugate eye movement) in order to prevent double vision. It was shown that during fast head shaking, adaptation takes place in each eye individually, however, the total change in vergence was slightly lower (<25%) than was anticipated. In literature, it is often assumed that the velocity gain (ratio of eye movement over head movement) of the vestibulo ocular reflex is directly related to the vergence angle. The vergence angle of the eyes is related to the distance of a fixation object from the head: the vergence angle is zero when the object is at a great distance, and increases when the object approaches. If an object approaches a moving head, the eyes have to move faster in order to stabilize the image on the retina. In this experiment, the vergence angle is changed by the prism, but the distance of the fixation object from the head is constant. In this situation, the eyes should not move faster or slower in the new situation: the velocity gain should remain constant. However, the velocity gain of the vestibulo ocular reflex decreased slightly with an increase of vergence angle. These results show that the velocity gain of the vestibulo ocular reflex is not under direct control of vergence but probably is controlled for each eye individually. It was suggested that besides retinal slip also retinal image position in each eye individually has a major influence on eye movements even at high head rotation frequencies.

In **chapter 3**, stability of binocular eye movements during smooth pursuit was investigated in normal subjects and in subjects with diminished stereopsis. In this chapter, the validity of Donders' law is investigated during smooth pursuit. Donders' law states, that independent of

the path the eye takes, the three-dimensional orientation of the eye is always the same in each fixation direction. The results show that, in normal subjects, Donders' law was obeyed during smooth pursuit eye movements, although there were some small deviations: all subjects showed a temporal dissociation between horizontal and torsional eye movements. These dissociations lead to hysteresis, which is a direct violation of Donders' law. The observed phase shift between horizontal and torsional eye movements may have been caused by biomechanical factors at the plant: a combination of elasticity and viscosity of the oculomotor plant affect the velocity of eye movements. Viewing conditions did not influence the stability of vergence eye movements in normal subjects. This may indicate that real-time visual feedback from both eyes is not essential for binocular coupling, during smooth pursuit, in normal subjects.

In order to investigate the binocular coupling of eye movements, vergence stability was investigated. In subjects with micro-strabismus without amblyopia, we found no significant difference in size of horizontal and vertical vergence stability compared to our normal subjects. Vertical vergence stability was highest, followed by horizontal vergence stability. Torsional vergence was less stable compared to controls. In our subjects with amblyopia we observed both horizontal and torsional vergence instability compared to normal subjects. From these results it is most likely to conclude that horizontal vergence instability is predominantly caused by amblyopia.

In patients with strabismus and/or amblyopia, horizontal vergence stability depended on which eye was fixating the target. Although the amount of subjects participating in the experiment and the observed variability does not allow us to make wide generalisations, we suggest the following: it is possible that vergence stability is controlled visually in subjects with strabismus. When these subjects look monocularly with their squinting eye, information of the periphery of the retina is mainly used where acuity is lower. In contrast to normal subjects, who apparently do not need visual feedback for binocular coupling of eye movements, real time visual feedback is essential in patients with strabismus during smooth pursuit.

In **chapter 4** we investigated whether Listing's law applies in patients with diminished or no stereopsis. Listing's law describes specifically the torsional orientation of an eye in each fixation direction. It states that all rotation vectors describing eye movements are positioned in a flat plane: the so-called *displacement plane*. In this experiment the shape and orientation of the displacement planes were measured in both patients and controls. Three-dimensional eye movements of normal subjects and patients with strabismus and/or amblyopia were registered during monocular and binocular fixation conditions.

The control group and patient with amblyopia due to anisometropia showed normal Listing behaviour. Patients with strabismus and amblyopia obeyed Listing's law less accurate: the planes of both eyes were thicker compared to the normal subjects and the relative orientation of the planes, i.e. the angle between both planes, varied with fixation conditions, indicating that Listing's law is not accurately obeyed in these patients. These results show, that normal Listing behaviour can be present in subjects with diminished stereopsis. It also shows that normal stereopsis does not necessarily mean normal Listing behaviour. Because no clear relation was found between stereopsis and the shape and orientation of displacement planes, it would appear that Listing's law is mainly a result of motor strategy.

In **chapter 5** three-dimensional eye movements of five adult patients with strabismus were measured before and after strabismus surgery, thereby investigating the influence of a radical change in mechanical properties of the eye plant on the three-dimensional binocular eye movements. From the data, the shape and orientation of the displacement planes was determined. We investigated whether Listing's law is a consequence of two-dimensional control, where eye torsion is determined by biomechanical properties of the orbita, or whether it is a reflection of full three-dimensional neuronal control. If Listing's law were the result of two-dimensional neural control, the operation would have a large effect on the eye movements. After the operation, four out of five patients obeyed Listing's law more accurately. In one patient, the changes were hardly detectable. In all patients who were operated in one eye, the monocular orbital change caused binocular improvements of torsional control. The relative orientation of both displacement planes also changed, however no clear relationship was found between type of operation and direction of rotation. These results show, that Listing's law is not just a result of biomechanical properties of the eye plant, but must have a neural basis. Therefore, Listing's law is a reflection of full three-dimensional neuronal control.

In **chapter 6**, a system was described to measure two-dimensional binocular eye movements with one video camera placed at ± 2.5 meters from the subject. The system uses the corneal reflex-bright pupil technique to register horizontal and vertical eye movements 25 times per second. Due to the non-intrusive and easy set-up eye movements of both adults and small infants (babies) can be measured. The accuracy of the system was measured by comparing its results with simultaneous measurements using scleral search coils in a healthy subject. During steady fixation both systems showed a slight spread in data-points: the video system showed a standard deviation of $\pm 0.3^\circ$ horizontally and $\pm 0.6^\circ$ vertically compared to $\pm 0.1^\circ$ in both directions when measured with scleral search coils. The correlation coefficient between both systems is 0.98 horizontally and 0.95 vertically, indicating that horizontal eye movements are measured more accurate than vertical eye movements. With this new video system, we have a tool to measure two-dimensional binocular eye movements in both adults and babies.

7.2 In conclusion.

The basic questions in this thesis are how we control our eyes three-dimensionally and why in the specific way as already was described by Ruete and Listing in 1853. This thesis, and earlier investigations, showed that it is not easy to describe the eye movements of patients with strabismus and/or amblyopia in a simple model. As a result, this thesis does not present new rules that apply to these patients, but instead shows the differences with eye movements of normal subjects. From these results we could make the following conclusions.

In chapter 5 we determined that the brain controls all eye movements in three dimensions (horizontal, vertical and torsional), instead of the also mentioned two dimensional model. The brain then weighs two factors: the optimization of ocular motor control and assistance of binocular vision. In chapter 4 we concluded that the brain appears to put more weight on the optimization of ocular motor control than on the assistance of binocular vision. The results in chapter 2 suggested that in healthy subjects, visual feedback can influence binocular eye movements, even during fast head movements. In chapter 3 we saw, that patients with diminished stereopsis used visual feedback for small adjustments in eye movements. These patients, in contrast to normal subjects, appear to use information from the periphery of the retina, to adjust their eye movements.

Strabismus and amblyopia can start to manifest themselves in the first months after birth and can be caused by optical, neurological or muscular factors. The balance of these mechanisms is delicate. Both motoric and sensoric development of binocularity takes place at the same time in these first months. By measuring eye movements of small infants with the system described in chapter 6, normal development of binocular eye movements can be recorded. Perhaps, this information can be used in the future to intervene sooner and more effectively when the development of a small child is disturbed.

8.1 Samenvatting.

Als met beide ogen gekeken wordt naar een voorwerp, kunnen onze hersenen de informatie van beide ogen combineren en hiervan een dieptebeeld maken (stereopsis). Dit kan echter alleen als beide ogen daadwerkelijk nauwkeurig op het voorwerp gericht zijn en het voorwerp kunnen waarnemen. Indien aan een van deze voorwaarden niet wordt voldaan, zal stereopsis in mindere mate of helemaal niet aanwezig zijn. Dit geldt bijvoorbeeld voor patiënten die scheefzien (strabismus) of een lui oog hebben (amblyopia). Bij gezonde proefpersonen kunnen de binoculaire oogbewegingen beschreven worden met behulp van de wet van Listing. Deze wet voorspelt de oogoriëntaties in drie dimensies (horizontaal, verticaal en torsioneel) nauwkeurig. Hoewel de oogbewegingen van gezonde proefpersonen nauwkeurig beschreven zijn, is de oorsprong en achtergrond van de wet van Listing nog steeds niet volledig begrepen. Een aantal aspecten zijn vooralsnog onbekend. In dit proefschrift worden aan aantal van deze aspecten onderzocht. Waarom bewegen onze ogen op deze specifieke manier, in hoeverre draagt visuele terugkoppeling bij tot de binoculaire controle van oogbewegingen en hoe worden de oogbewegingen neuronaal gecontroleerd? Een ander aspect dat wordt onderzocht is de vraag of patiënten met strabismus of amblyopie dezelfde wetten volgen als gezonde proefpersonen. Tenslotte wordt een systeem beschreven waarmee binoculair horizontale en verticale oogbewegingen gemeten kunnen worden met een videosysteem. Dit systeem kan worden toegepast bij onderzoek naar de ontwikkeling van binoculaire oogbewegingen bij pasgeborenen.

In **hoofdstuk 1** wordt een algemene inleiding gegeven op het gebied van oogbewegingen. In dit hoofdstuk komt onder andere aan bod de verschillende types oogbewegingen, anatomie van oogspieren, de wetten van Donders en Listing en de definitie van binoculariteit.

In **hoofdstuk 2** wordt onderzocht wat de invloed is van een snelle verandering van visuele informatie op de binoculaire controle van oogbewegingen. Terwijl de proefpersoon snel met zijn hoofd schudt wordt door middel van een prisma de visuele informatie plotseling veranderd. Dit prisma heeft tot gevolg, dat de proefpersoon een horizontale vergentiebeweging (een gedisonjugeerde oogbeweging) dient te maken om te voorkomen dat hij dubbel ziet. Het experiment toont aan dat beide ogen zich individueel aanpassen aan de nieuwe situatie. De aanpassing was echter kleiner dan verwacht: de verandering van vergentiehoek was 25% kleiner dan verwacht.

In de literatuur wordt er regelmatig vanuit gegaan, dat de velocity gain (ratio van de snelheid van oogbeweging en hoofdbeweging) van de vestibulo-oculaire reflex direct gekoppeld is aan de vergentiehoek. De vergentiehoek van de ogen is namelijk direct gerelateerd aan de afstand tussen het hoofd en het fixatievoorwerp: de vergentiehoek is nul bij een 'blik op oneindig' en neemt toe als het voorwerp het hoofd nadert. Als een voorwerp een bewegend hoofd nadert, dienen de ogen sneller te bewegen om het beeld te stabiliseren op de retina. In dit experiment, wordt de vergentiehoek veranderd door middel van een prisma, zonder de afstand van het voorwerp te veranderen. In deze situatie dienen de ogen dus niet sneller te bewegen, oftewel de velocity gain van de vestibulo-oculaire reflex dient constant te blijven. Het bleek echter, dat de velocity gain licht verminderde bij een convergente oogbeweging. Dit resultaat toont aan dat de velocity gain niet direct gecontroleerd wordt door een vergentiemechanisme, maar waarschijnlijk door visuele informatie van elk oog individueel. Hierdoor zou het mogelijk kunnen zijn, dat naast retinale slip ook retinale beeld positionering in elk oog invloed heeft op de oogbewegingen, zelfs tijdens snelle hoofdbewegingen.

In **hoofdstuk 3** wordt de stabiliteit van binoculaire oogbeweging tijdens smooth pursuit (een gladde volgbeweging) bepaald bij gezonde proefpersonen en bij patiënten met micro-strabismus (scheelzienshoek kleiner dan 5°) en/of amblyopie. In dit hoofdstuk wordt de validiteit van de wet van Donders onderzocht tijdens smooth pursuit. De wet van Donders stelt, dat de oogoriëntatie in een bepaalde kijkrichting altijd hetzelfde is, onafhankelijk van de weg die het oog heeft afgelegd om in die positie te komen. De resultaten tonen aan dat de groep gezonde proefpersonen de wet van Donders redelijk nauwkeurig gehoorzaamt, hoewel er kleine afwijkingen zijn: er wordt een faseverschil geconstateerd tussen horizontale en torsionele oogbewegingen. Dit faseverschil leidt tot hysteresis, wat een schending is van de wet van Donders. Deze kleine afwijkingen worden waarschijnlijk veroorzaakt door een combinatie van viskeuze en elastische eigenschappen van het oog en de oogspieren aangezien deze een directe invloed hebben op de snelheid van oogrotaties. Monoculaire kijkcondities blijken geen invloed te hebben op de vergentiestabiliteit van de gezonde proefpersonen. Hieruit kan worden afgeleid dat in deze groep, real-time visuele terugkoppeling van beide ogen niet noodzakelijk is voor de binoculaire koppeling van oogbewegingen.

Om de mate van koppeling van oogbewegingen van de patiënten te vergelijken met die van gezonde proefpersonen werd vervolgens de vergentiestabiliteit bepaald. De verticale vergentiestabiliteit was hoger dan de horizontale vergentiestabiliteit in de groep patiënten met micro-strabismus zonder amblyopie, echter beide waren niet significant lager dan de controle groep. De torsionele vergentiestabiliteit (cyclovergentie) was wel lager dan in de controle groep. Zowel de horizontale als torsionele vergentiestabiliteit was bij de patiënten met amblyopie lager vergeleken met de controle groep. Uit deze resultaten kan worden afgeleid dat horizontale vergentiestabiliteit voornamelijk wordt veroorzaakt door de amblyopie. Tenslotte bleek in alle patiënten de mate van horizontale vergentiestabiliteit af te hangen van de kijkcondities. Hoewel het aantal proefpersonen en de mate van variabiliteit tussen proefpersonen het ons niet toestaat om algehele conclusies te trekken, kan het volgende dit resultaat verklaren: wellicht wordt in patiënten met strabismus, in tegenstelling tot gezonde proefpersonen, de vergentiestabiliteit visueel gecontroleerd. Bij de gezonde proefpersonen bleek het afdekken van één oog geen invloed te hebben op de vergentiestabiliteit, dit in tegenstelling tot de patiëntengroep. Wellicht hebben deze patiënten visuele terugkoppeling nodig voor de binoculaire controle. Aangezien de visuele informatie van het aangedane oog van deze patiënten minder scherp is, zou dit direct invloed kunnen hebben op de vergentiestabiliteit.

In **hoofdstuk 4** wordt onderzocht of patiënten met strabismus en/of amblyopie de wet van Listing gehoorzamen. Een afleiding van deze wet stelt, dat de rotatievectoren van de bewegingen van een oog in één plat vlak dienen te liggen: het zogenaamde displacement plane. In dit experiment wordt de vorm en oriëntatie van de displacement planes bepaald in beide ogen van een groep patiënten en vergeleken met die van een controle groep. Daartoe werden de driedimensionale oogbewegingen gemeten tijdens monoculaire en binoculaire fixatie condities.

Bij de controle groep en een patiënt met amblyopie door anisometropie werden normale displacement planes aangetroffen. De patiënten met strabismus en amblyopie gehoorzaamden de wet van Listing in mindere mate dan de mensen in de controlegroep. Dit bleek doordat zowel de displacement planes van de patiënten dikker waren en de relatieve oriëntatie, oftewel de hoek tussen de displacement planes van beide ogen, aanzienlijk varieerde tussen fixatie condities. Dit laatste gebeurde niet in de controle groep. Uit deze resultaten kan

worden geconcludeerd dat normaal Listing gedrag kan voorkomen bij patiënten met verminderde stereopsis. Echter het omgekeerde wordt ook aangetoond: een patiënt met normale stereopsis vertoonde abnormaal Listing gedrag. Aangezien er geen directe relatie ontdekt kon worden tussen de mate van stereopsis en de vorm van de displacement planes lijkt het erop dat de wet van Listing grotendeels het gevolg is van een motor strategie.

In **hoofdstuk 5** werden de driedimensionale oogbewegingen van vijf volwassen strabismus patiënten gemeten voor en na een correctie operatie. Uit de data werd vervolgens de vorm en oriëntatie van de displacement planes bepaald. Aan de hand van deze waardes werd onderzocht of onze oogbewegingen het gevolg zijn van een tweedimensionale of driedimensionale neuronale aansturing. In het driedimensionale paradigma worden horizontale, verticale en torsionele oogbewegingen neuronaal gestuurd. In het andere paradigma wordt alleen de horizontale en verticale beweging neuronaal gestuurd, en wordt oogtorsie (de derde dimensie) volledig bepaald door biomechanische eigenschappen van het oog en de oogspieren. De operatie heeft een radicale invloed op de biomechanische eigenschappen van de oogspieren en zou met name grote invloed moeten hebben op de oogbewegingen als het tweedimensionale paradigma van toepassing is. Na de operatie bleken vier van de vijf patiënten de wet van Listing beter te gehoorzamen dan ervoor. Bij één patiënt kon amper een verschil worden aangetoond. Tevens bleek dat bij alle patiënten die aan één oog waren geopereerd, de operatie invloed had op de oogbewegingen van beide ogen: met name de binoculaire controle van torsionele oogbewegingen verbeterde, oftewel nam de cyclovergentiestabiliteit toe. Er kon geen eenduidige relatie gevonden worden tussen type operatie en oriëntatie verandering van de vlakken. Deze resultaten tonen aan dat de wet van Listing niet slechts het gevolg is van biomechanische eigenschappen van het oog en de spieren, maar dat het een neuronale basis heeft. Oftewel, onze oogbewegingen worden driedimensionaal neuronaal aangestuurd.

In **hoofdstuk 6** wordt een systeem beschreven waarmee binoculair, tweedimensionale oogbewegingen gemeten kunnen worden met behulp van een videocamera geplaatst op $\pm 2.5\text{m}$ afstand van de proefpersoon. Het systeem maakt gebruik van de cornea reflectie die ontstaat doordat naast de camera een infrarood lamp geplaatst is. Het systeem meet de positie van de cornea reflecties ten opzicht van de pupil centra (welke helder zijn opgelicht) en bepaalt hieruit automatisch de horizontale en verticale positie van beide ogen 25 keer per seconde. Het systeem is uitermate geschikt om de binoculaire oogbewegingen van baby's en kleine kinderen te meten, aangezien het systeem de proefpersoon niet belast en snel kan worden opgezet. De nauwkeurigheid van het systeem werd bepaald door metingen te verrichten bij een proefpersoon, gelijktijdig met de 'gouden standaard'; het scleral coils systeem. Tijdens fixatie toonden beide systemen een kleine spreiding in datapunten: het video systeem had een horizontale spreiding (weergegeven in standaard deviaties) van $\pm 0.3^\circ$ en een verticale spreiding van $\pm 0.6^\circ$, terwijl het coilsysteem een spreiding toonde van $\pm 0.1^\circ$ in beide richtingen. De correlatie coëfficiënt tussen de data van beide systemen was 0.98 horizontaal en 0.95 verticaal. Deze resultaten tonen aan dat het videosysteem horizontaal systematisch nauwkeuriger meet dan verticaal.

8.2 Concluderend

Aan de basis van dit proefschrift liggen de vragen hoe onze ogen worden aangestuurd en waarom op de specifieke manier zoals Ruete en Listing reeds in 1853 hebben beschreven. Bij patiënten met strabismus en/of amblyopie blijkt het niet zo eenvoudig te zijn om hun oogbewegingen eenduidig te beschrijven en te modelleren. In dit proefschrift worden derhalve niet de regels beschreven die de ogen van deze mensen volgen, maar worden de afwijkingen ten opzichte van gezonde proefpersonen beschreven. Aan de hand van deze resultaten konden we een aantal zaken vaststellen.

In hoofdstuk 5 stelden we vast dat de hersenen de ogen in drie dimensies aanstuurt, dit in tegenstelling tot het eerder genoemde tweedimensionale model. Hierbij wordt een weging gemaakt tussen de optimalisatie van de oogbewegingen en de ondersteuning van de binoculaire functies, waarbij de optimalisatie van oogbewegingen zwaarder gewogen wordt dan de ondersteuning van de binoculaire functie (hoofdstuk 4).

Uit hoofdstuk 2 bleek dat bij gezonde proefpersonen visuele terugkoppeling van elk oog afzonderlijk, zelfs bij snelle hoofdbewegingen, invloed kan uitoefenen op de oogbewegingen. In hoofdstuk 3 werd geopperd, dat patiënten met verminderde stereopsis visuele terugkoppeling gebruiken voor kleine correcties van oogbewegingen. Deze patiënten, in tegenstelling tot gezonde proefpersonen, lijken op deze manier aan de hand van grove, perifere informatie van de retina, de oogbewegingen te corrigeren.

Oogaandoeningen zoals strabismus en amblyopie kunnen zich reeds manifesteren in de eerste maanden na de geboorte van een baby. Er kunnen neurologische, musculaire (bio-mechanische) of optische redenen ter grondslag liggen. De balans tussen deze factoren is delicaat. De motorische en sensorische ontwikkeling van binoculariteit vindt tegelijkertijd plaats in deze eerste maanden. Door de oogbewegingen van baby's te meten met behulp van het in hoofdstuk 6 beschreven videosysteem, kan de normale ontwikkeling van de binoculariteit vastgelegd worden. Deze informatie kan er wellicht toe leiden dat men in de toekomst eerder en effectiever kan ingrijpen bij een gestoorde ontwikkeling.